

亚热带典型地貌下旱地和水田可溶性有机物化学组成特征^①

郑小东^{1,2,3}, 陈香碧^{1,3}, 胡亚军^{1,3}, 苏以荣^{1,3*}

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站, 广西环江 547100)

摘要: 阐明亚热带典型地貌下旱地与水田土壤可溶性有机物(DOM)化学组成差异可为农田土壤 DOM 稳定性评价提供理论依据。研究采用 XAD-8 树脂分组和热裂解气质联用仪(Py-GCMS)技术, 分析比较休闲期、耕作期亚热带喀斯特山区、丘陵区及平原湖区旱地和水田土壤 DOM 化学组成特征。结果表明: 休闲期, 亲、疏水性可溶性有机碳(DOC)含量以水田(10.2、33.4 mg/kg)显著高于旱地(4.15、12.8 mg/kg), 耕作期无显著性差异。与休闲期相比, 耕作期水田亲、疏水性 DOC 含量均显著降低, 而旱地亲、疏水性组分 DOC 含量在两个时期保持相对稳定。休闲期旱地和水田土壤 DOM 中有机酸相对比例分别为 31.9%、35.6%, 耕作期显著降至 17.9%、20.0%($P<0.05$)。脂类相对比例趋势与有机酸相反, 旱地和水田土壤 DOM 中脂类相对比例在休闲期分别为 55.0%、49.5%, 耕作期显著增至 70.1%、62.9%($P<0.05$)。Adonis 分析表明, 亲、疏水性 DOC 含量在旱地和水田、休闲期和耕作期差异显著($P<0.05$); DOM 化学组成在不同时期(休闲期和耕作期)及地貌(喀斯特山区和丘陵区、丘陵区和平原湖区)差异显著($P<0.05$)。Random Forest 分析表明, 有机酸和脂类参与微生物代谢过程, 在休闲期和耕作期差异显著($P<0.05$); 芳香化合物作为 DOM 稳定性组分, 在不同地貌区差异较大($P<0.05$)。总体上, 田间条件下水田 DOC 比旱地 DOC 对时期响应更敏感, 且土壤 DOM 中微生物代谢相关组分(有机酸、脂类)和稳定性组分(芳香族化合物)在不同时期及地貌区的差异性不同, 这对评价旱地和水田土壤 DOM 稳定性及土壤有机碳积累具有一定的参考意义。

关键词: 可溶性有机物; 化学组成; 旱地; 水田; 休闲期; 耕作期

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A

土壤质量及可持续发展、气候变化问题一直是全球关注的焦点, 与这些紧密联系的土壤活性碳组分, 尤其是可溶性有机物(DOM) 近几十年来成为研究者研究的热点问题之一^[1]。土壤 DOM 化学组成极为复杂, 其去向包括矿化、吸附、转化进入土壤有机质以及以溶解态残留在土壤中, 进而影响温室气体排放、土壤养分供应及土壤碳平衡等过程^[2-3]。不同 DOM 化学组成在土壤中的去向差异明显, 小分子化合物如有机酸、葡萄糖、氨基酸, 极易被微生物利用矿化, 而高分子化合物降解性低, 通常以稳定形态存在于土壤中^[4]; 亲水性 DOM 移动性强、易从土壤中流失, 而疏水性 DOM 易被土壤吸附, 参与土壤有机碳(SOC)形成。阐明不同土壤 DOM 化学组成特征对于理解土壤 DOM 降解特征及稳定性具有重要意义。

土壤 DOM 化学组成复杂, 主要来源包括 SOC、

凋落物、根系分泌物及微生物代谢产物。不同来源 DOM 化学组成、生物降解性差异较大。来源于根系分泌物的土壤 DOM 以小分子量有机酸为主, 降解性高^[5]; 不同凋落物类型的 DOM 化学组成及复杂性差异较大, 生物降解率表现为灌木>乔木>草本^[6]; 木质素来源的 DOM 含有较多的芳香族化合物, 降解性较低^[7]。此外, 微生物代谢产物是土壤 DOM 的重要来源, 环境因素如温度、土壤基本性质也可以通过改变微生物代谢活性, 从而影响土壤 DOM 组成。可见, 土壤 DOM 化学组成受 DOM 来源及环境条件共同影响。

旱地和水田是我国亚热带地区农田生态系统两种常见的土地利用方式, 以往研究表明, DOM 化学组成可能是旱地和水田固碳能力差异的主要因素之一^[8]。已有研究结果表明旱地 DOM 芳香性和腐殖化程度高于水田^[9-10], 但这不能全面反映土壤 DOM 的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471199 和 41671298)资助。

* 通讯作者(yrsu@isa.ac.cn)

作者简介: 郑小东(1987—), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要从事土壤生态与农业环境研究。E-mail: 550895299@qq.com

化学组成与分子特征。现有关于农田土壤 DOM 化学组成研究多偏向于控制因子性试验,对自然环境条件下农田土壤 DOM 化学组成的了解有待深入。受人为耕作管理措施影响,农田生态系统环境因素比自然生态系统更为复杂。旱地和水田因农作管理措施差异,土壤物理化学和生物学性质明显不同^[11-12],水田土壤微生物活性高于旱地土壤;不同有机物料来源的 DOM 化学组成多样化,不同施肥习惯也可能影响 DOM 化学组成。并且不同地貌区土壤性质、气候因素及农作管理习惯存在较大差异,通过影响微生物代谢过程改变土壤 DOM 化学组成^[13-14]。基于此,本研究分析亚热带典型地貌下的旱地和水田土壤 DOM 化学组成,阐明土壤 DOM 化学组成的主要影响因素,以期揭示农田 SOC 周转机制及固碳机理提供基础。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

研究区包括我国亚热带区域喀斯特山区(广西环江)、红壤丘陵区(湖南常德)及平原湖区(湖南岳阳),气候类型为亚热带季风气候。喀斯特山区、丘陵区和平原湖区的年降雨量分别为 1 750、1 437、1 423 mm,平均气温分别为 19.9、16.5、16.9℃。每个地区于休闲期(3月)和耕作期(7月)随机采集 5 对连续耕作 20 a 以上的相邻旱地和水田土壤(样地信息及土壤基本性质见表 1),每个田块按照“S”形采集多点表层(0~15 cm)土壤样品混合成 1 个土壤样品,置于聚丙烯袋中并密封,尽快运回实验室于 4℃ 保存。指标分析前,将土壤中的根系和石砾挑除,并把土壤分成两部分,一部

表 1 旱地和水田样地信息及土壤基本性质
Table 1 Detailed geographical information and basic properties in upland and paddy soils sampled

| 样地 | 编号 | 地理位置 | 海拔(m) | 种植制度 | pH | | 有机碳 (g/kg) | |
|---------|----|-----------------------------|-------|-------|------|------|------------|------|
| | | | | | 休闲期 | 耕作期 | 休闲期 | 耕作期 |
| 喀斯特山区旱地 | 1 | 24°57'28.8"N, 108°1'27.9"E | 457 | 玉米、红薯 | 7.69 | 7.77 | 18.7 | 18.5 |
| | 2 | 24°57'50.6"N, 108°0'49.7"E | 503 | 玉米、红薯 | 6.16 | 6.20 | 9.9 | 9.5 |
| | 3 | 24°57'41.2"N, 108°3'1.3"E | 516 | 玉米、红薯 | 7.26 | 7.28 | 12.8 | 12.5 |
| | 4 | 24°58'18.5"N, 108°0'21.7"E | 393 | 玉米、红薯 | 6.25 | 6.35 | 15.9 | 15.8 |
| | 5 | 24°57'1.3"N, 107°59'58.5"E | 396 | 玉米、红薯 | 5.24 | 5.30 | 16.4 | 15.9 |
| 喀斯特山区水田 | 1 | 24°57'27.1"N, 108°1'27.2"E | 449 | 单季稻 | 7.78 | 7.58 | 44.8 | 44.7 |
| | 2 | 24°57'38.4"N, 108°0'52"E | 489 | 单季稻 | 7.66 | 7.56 | 32.8 | 33.3 |
| | 3 | 24°57'36.2"N, 108°2'55.3"E | 527 | 单季稻 | 7.72 | 7.61 | 47.2 | 47.3 |
| | 4 | 24°57'28.8"N, 108°1'27.18"E | 386 | 单季稻 | 6.08 | 5.91 | 29.6 | 29.9 |
| | 5 | 24°57'0.8"N, 107°59'54.6"E | 389 | 单季稻 | 5.45 | 5.29 | 35.9 | 36.1 |
| 丘陵区旱地 | 1 | 29°15'32.7"N, 111°32'3.1"E | 105 | 棉花、油菜 | 4.74 | 4.63 | 9.8 | 9.5 |
| | 2 | 29°15'49.7"N, 111°31'57.5"E | 99 | 棉花、油菜 | 4.93 | 4.76 | 11.5 | 10.9 |
| | 3 | 29°15'13.9"N, 111°31'35.2"E | 103 | 棉花、油菜 | 5.31 | 5.17 | 11.2 | 10.9 |
| | 4 | 29°14'19.3"N, 111°32'33.8"E | 96 | 棉花、油菜 | 4.75 | 4.59 | 15.3 | 14.8 |
| | 5 | 29°14'19.3"N, 111°32'33.9"E | 86 | 棉花、油菜 | 5.08 | 4.96 | 9.2 | 8.8 |
| 丘陵区水田 | 1 | 29°15'16.5"N, 111°31'55.5"E | 92 | 单季稻 | 5.22 | 5.20 | 18.9 | 18.8 |
| | 2 | 29°15'51.5"N, 111°31'59"E | 97 | 单季稻 | 5.18 | 5.12 | 15.8 | 15.4 |
| | 3 | 29°15'22"N, 111°31'38.1"E | 93 | 单季稻 | 4.87 | 4.85 | 17.9 | 17.6 |
| | 4 | 29°14'58.3"N, 111°32'22.8"E | 88 | 单季稻 | 4.87 | 4.82 | 21.7 | 21.5 |
| | 5 | 29°14'25.9"N, 111°32'36.7"E | 94 | 单季稻 | 5.21 | 5.16 | 21.1 | 21.0 |
| 平原湖区旱地 | 1 | 29°28'49.2"N, 112°45'55.8"E | 31 | 玉米、小麦 | 7.9 | 7.83 | 14.2 | 14.0 |
| | 2 | 29°30'13.6"N, 112°46'11.6"E | 32 | 玉米、小麦 | 8.13 | 8.04 | 9.5 | 9.8 |
| | 3 | 29°30'8.9"N, 112°46'27.2"E | 51 | 玉米、小麦 | 8.01 | 7.95 | 14.8 | 14.9 |
| | 4 | 29°30'11.6"N, 112°47'10.5"E | 47 | 玉米、小麦 | 7.98 | 7.88 | 14.3 | 14.5 |
| | 5 | 29°30'29.5"N, 112°46'49.7"E | 53 | 玉米、小麦 | 7.84 | 7.75 | 14.2 | 14.1 |
| 平原湖区水田 | 1 | 29°29'0.5"N, 112°45'58.5"E | 32 | 单季稻 | 7.58 | 7.39 | 19.9 | 19.5 |
| | 2 | 29°29'17"N, 112°45'56.4"E | 24 | 单季稻 | 6.66 | 6.51 | 22.9 | 22.3 |
| | 3 | 29°30'3.5"N, 112°46'28.5"E | 36 | 单季稻 | 7.65 | 7.42 | 30.9 | 30.6 |
| | 4 | 29°29'34.2"N, 112°46'59.8"E | 61 | 单季稻 | 6.42 | 6.25 | 19.9 | 19.3 |
| | 5 | 29°29'26.4"N, 112°46'56.7"E | 51 | 单季稻 | 5.91 | 5.69 | 26.2 | 25.8 |

分置于 4℃ 备用用于可溶性有机物(DOM)提取,另一部分在室温下风干,用于测定土壤水分、SOC 和 pH。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 DOM 提取、分组与化学组分鉴定

称取一定量的土壤鲜样,在土水比(m/v)为 1:2, 20℃ 条件下 200 r/min 振荡 1 h;将浸提液在 4℃ 12 000 r/min 下离心 10 min;所得上清液过 0.45 μm 微孔滤膜,即为 DOM 溶液^[15]。所得 DOM 溶液分为 3 部分,分别进行 DOC 含量测定、分组及冷冻干燥。

DOM 分组步骤如下:使用 XAD-8 离子交换树脂(安伯来特)对 DOM 进行亲水和疏水性组分的分组^[16]。在分组前,XAD-8 树脂在索氏抽提器中分别用甲醇、乙腈、乙醚清洗。清洗干净的 XAD-8 树脂装入玻璃填充柱中(直径 0.7 cm),然后分别用超纯水、甲醇、0.1 mol/L NaOH、0.1 mol/L HCl 充分淋洗,最后再用超纯水反复润洗。分组时,将 DOM 溶液 pH 用 HCl 调为 2.0,保持蠕动泵流速为 0.6~0.7 ml/min,将溶液过 XAD-8 树脂柱,滤液即为亲水性组分,而疏水性组分吸附在 XAD-8 树脂中。

DOM 溶液冷冻干燥所得 DOM 固体用热裂解气相色谱-质谱联用仪(Py-GCMS)测定 DOM 化学组成。具体步骤为:0.5 mg DOM 固体样品添加四甲基铵氢氧化物(TMAH)溶液(溶于甲醇中)后在 400℃ 下热化学裂解 30 min,热裂解产物置于气相质谱联用仪上进行自动分析。分析过程如下:1 μl 样品被自动注射到气相色谱中,该色谱仪连接有分裂模的毛细管注射器(分裂比为 30:1,温度恒定为 250℃)和熔融石英毛细管柱(30 m × 0.25 mm,膜厚度 0.25 μm)。载气为氦气,其流速为 1.8 ml/min。校准用标准物质为异辛烷八氟萘。柱式加热炉的初始温度设定为 80℃ 并保持 1 min,然后以 4℃/min 的速度上升至 180℃,再以 10℃/min 的速度上升至 320℃,并保持 10 min。质

谱分光光度计经校准后在全扫描模式下进行操作,扫描范围为 $m/z = 50 \sim 1\ 200$,电子冲击离子化能量为 70 eV,扫描速度为 1.0 s/san。运用 NIST 质谱数据库和软件(NIST 2002, Perkin-Elmer, USA)对产物质谱图进行匹配鉴定,通过裂解产物的质谱与数据库质谱图的详细对比可识别产物名称^[17]。相比于其他方法,Py-GCMS 技术前处理不复杂、测定组分多样化,尽管该技术的检测物为裂解物,但根据已有文献结果,可将裂解产物归类为原 DOM 化合物组分^[18-19]。

1.2.2 指标测定

土壤基本理化性质采用鲍士旦^[20]主编的《土壤农化分析》中常规方法测定。滤液中的 DOC 和分组所得亲水性 DOC 用岛津 TOC-5050A 总有机碳仪测定;DOM 中芳香族物质含量的测定:将 DOC 含量稀释为 2 mg/L,在紫外分光光度计 254 nm 下测定其分光光度值(E_{254}),即代表 DOM 中芳香族物质含量^[21]。

1.3 数据处理

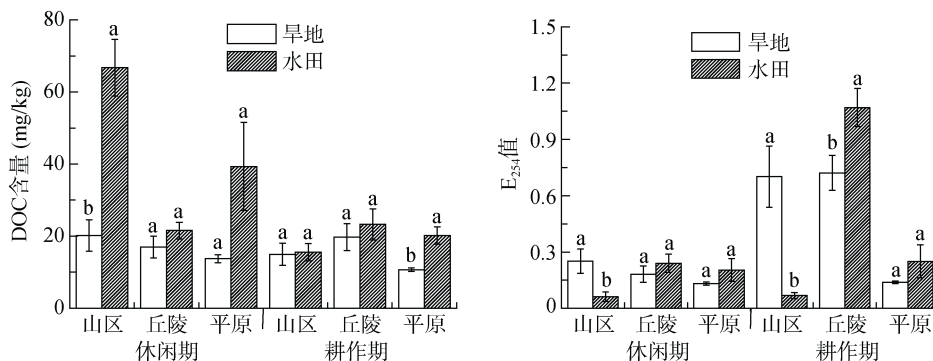
疏水性 DOC 含量为 DOC 总含量与亲水性 DOC 含量的差值;采用 R 语言进行 Random Forest 分析和 Adonis 分析。Random Forest 分析使用 R 分析软件中的 randomforest 安装包进行,预测变量对响应变量的重要性则根据 rfpermute 安装包进行。Adonis 分析使用 R 分析软件中的 adonis 安装包进行。

数据处理和分析用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS18.0 软件完成;利用 Origin8.0 软件进行作图。

2 结果

2.1 土壤 DOC 含量与芳香性特征

休闲期,喀斯特山区和平原湖区水田 DOC 含量为 66.7、39.3 mg/kg,显著高于旱地土壤;丘陵区水田土壤 DOC 含量(21.6 mg/kg)略高于旱地土壤(17.0 mg/kg),差异未达显著水平(图 1)。休闲期和耕作期,喀斯特山区和平原湖区水田土壤 DOC 含量差



(图中山区、丘陵、平原分别代表喀斯特山区、丘陵区和平原湖区;不同小写字母表示同一地貌区不同土地利用方式间的差异达 $P < 0.05$ 显著水平)

图 1 DOC 含量及芳香性

Fig. 1 DOC content and its aromaticity

异显著，而丘陵区水田土壤 DOC 含量无显著差异。两个时期，各地貌下旱地土壤 DOC 含量变化较小。

E_{254} 值表示 DOM 芳香化指数，其大小与 DOM 中芳香化合物比例成正比。两个时期，喀斯特山区旱地 DOM 芳香性显著高于水田，而丘陵区和平原湖区，水田 DOM 芳香性总体大于旱地，其中在耕作期丘陵区水田 DOM 芳香性显著高于旱地。

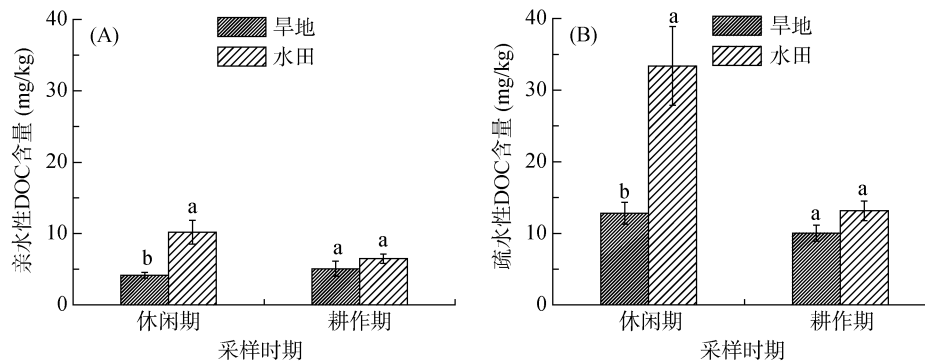
2.2 土壤亲水和疏水性 DOC 含量

Adonis 分析结果表明，不同土地利用方式(旱地和水田)和时期(休闲期和耕作期)下亲、疏水性 DOC 含量差异达极显著水平($P < 0.01$)，而不同地貌区两种 DOC 含量差异不显著(表 2)。休闲期，水田亲、疏水

表 2 基于 Adonis 分析的不同土地利用方式、时期及地貌下亲水及疏水 DOC 含量显著性差异

| 因子 | R^2 | F | P |
|---------------|-------|--------|---------|
| 旱地 vs 水田 | 0.192 | 13.771 | 0.001** |
| 休闲期 vs 耕作期 | 0.097 | 6.242 | 0.007** |
| 喀斯特山区 vs 丘陵区 | 0.043 | 1.697 | 0.177 |
| 喀斯特山区 vs 平原湖区 | 0.036 | 1.428 | 0.232 |
| 丘陵区 vs 平原湖区 | 0.023 | 0.908 | 0.325 |

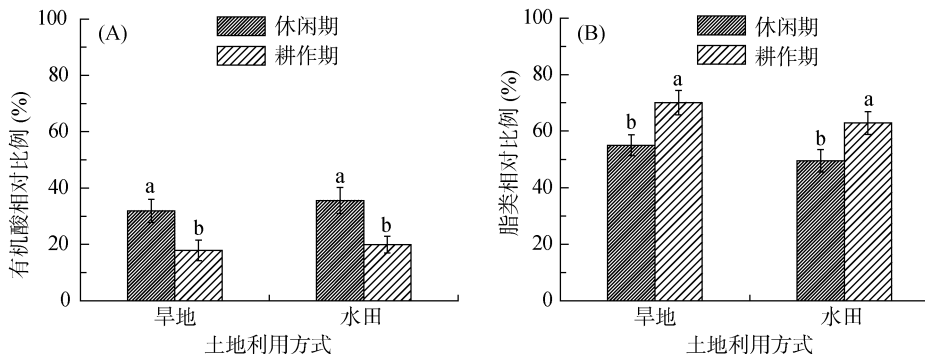
注：**代表在 $P < 0.01$ 水平差异达极显著水平。



(图中不同小写字母表示同一时期不同土地利用方式间的差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 2 旱地和水田土壤亲水及疏水性 DOC 含量

Fig. 2 Hi- and Ho-DOC contents of upland and paddy soils



(图中不同小写字母表示同一土地利用方式不同时期间的差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 3 旱地和水田土壤 DOM 中有机酸及脂类相对比例

Fig. 3 Relative proportions of organic acids and lipids in DOM in upland and paddy soils

性 DOC 含量分别为 10.2、33.4 mg/kg，显著高于旱地土壤(4.15、12.8 mg/kg)；而耕作期，旱地和水田亲、疏水性 DOC 含量差异不显著(图 2)。此外，旱地和水田两种 DOM 组分随时期响应变化不同。水田亲、疏水性 DOM 耕作期显著低于休闲期；而旱地两种 DOM 组分含量在休闲期和耕作期差异不显著($P > 0.05$)。

2.3 土壤 DOM 化学组成

脂类和有机酸是旱地和水田 DOM 的主要化学组成(图 3)。旱地和水田中有机酸相对比例以休闲期高于耕作期($P < 0.05$)，休闲期分别为 31.9%、35.6%，耕作期分别降至 17.9%、20.0%。两时期下脂类相对比例与有机酸趋势相反，旱地和水田土壤 DOM 中脂类相对比例在休闲期分别为 55.0%、49.5%，耕作期则分别显著增至 70.1%、62.9%。Adonis 分析结果表明，休闲期和耕作期，土壤 DOM 化学组成差异显著；喀斯特山区和丘陵区以及丘陵区和平原湖区的 DOM 化学组成差异显著(表 3)。采用 Random Forest 分析进一步阐明 DOM 具体组分在各因素下的显著性差异，结果表明，有机酸和脂类相对比例在不同时期差异显著，而芳香化合物相对比例在不同地貌区差异显著(图 4)。

表 3 基于 Adonis 分析的不同土地利用方式、时期及地貌下 DOM 化学组成显著性差异

Table 3 Significant differences in DOM compositions between different land use types, periods and landforms based on Adonis test

| 因子 | R^2 | F | P |
|---------------|-------|-------|--------|
| 旱地 vs 水田 | 0.013 | 0.781 | 0.504 |
| 休闲期 vs 耕作期 | 0.095 | 6.105 | 0.015* |
| 喀斯特山区 vs 丘陵区 | 0.115 | 4.952 | 0.018* |
| 喀斯特山区 vs 平原湖区 | 0.031 | 1.207 | 0.299 |
| 丘陵区 vs 平原湖区 | 0.127 | 5.524 | 0.012* |

注：*代表在 $P < 0.05$ 水平差异达显著水平，下同。

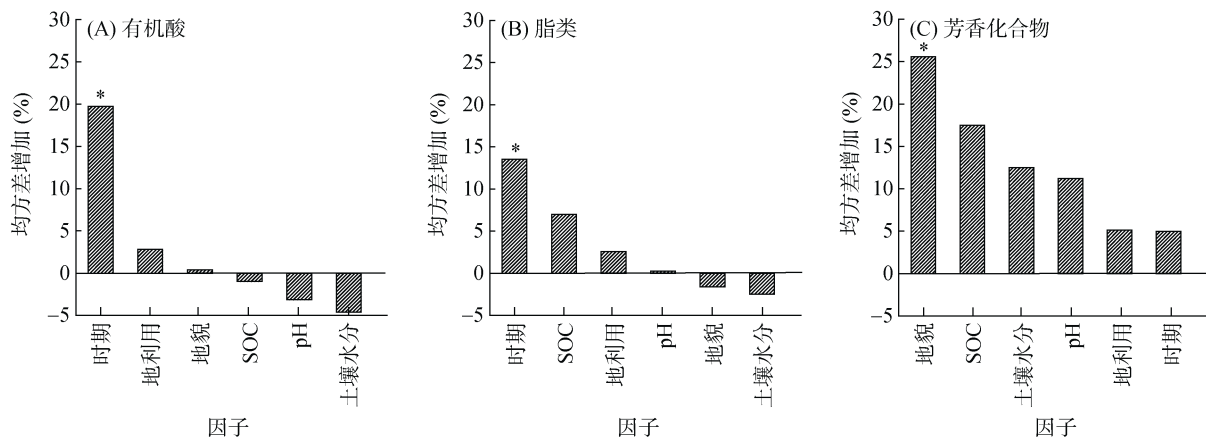


图 4 基于 Random Forest 分析的不同因子下主要 DOM 化学组成显著性差异

Fig. 4 Significant differences in primary DOM compositions under different factors based on Random Forest test

闲期 3 个地貌区土壤 DOC(亲水及疏水 DOC)含量均表现为水田大于旱地,这与水田 SOC 高于旱地是一致的。多数研究结果也指出,旱地和水田 DOC 含量与 SOC 含量表现为正相关关系^[26]。水田作物生长及人为管理措施在休闲期和耕作期差异较大,休闲期温度低、人为干扰少以及土壤长期浸水导致 DOC 含量较高;尽管耕作期作物根系分泌物会增加根际土壤 DOC 含量,但由于温度较高、人为管理措施频繁,水田微生物活性高于休闲期,导致该时期 DOC 含量降低^[27-28]。本研究两个时期期间,旱地土壤 DOC 含量稳定,而水田波动较大,这可能与旱地 DOC 化学组成比水田更复杂有关。

不同土地利用方式下土壤 DOM 化学组成差异较大。有研究通过比较不同土地利用方式(森林、草地、林地)土壤 DOM 化学组成,结果发现植被类型对 DOM 化学组成影响较大^[29]。森林土壤植被类型以木本科植物为主,农田土壤则以禾本科植物为主,比如水稻、玉米和小麦等。来源于木本科和禾本科植物的 DOM 化学组成差异很大,即木本科植物凋落物来源的 DOM 通常比禾本科作物来源 DOM 含有更多的木质素和其他难降解性化合物组分^[30],这是导致森

3 讨论

与多数研究结果相同^[22-23],DOC 含量在不同土地利用方式、时期下差异显著。休闲期水田土壤 DOC 含量高于旱地,这与韩成卫等^[24]以水为提取剂、过 0.45 μm 滤膜方法提取 DOC 的研究结果一致,但也有研究以水为提取剂、过滤纸方法提取 DOC,结果表明旱地 DOC 含量高于水田^[25]。这说明,提取方法对 DOM 性质影响较大。土壤 DOC 含量(包括亲、疏水性 DOC)受 SOC 含量及时期共同影响,本研究休

林土壤 DOM 化学组成比农田土壤 DOM 复杂的一个主要原因。本研究结果表明土地利用方式对 DOM 化学组成影响不明显,这可能与农田土壤种植作物以禾本科作物为主有关。

本研究通过 Py-GCMS 技术测定 DOM 化学组成,结果表明脂类和有机酸是 DOM 的主要组分并随时期显著变化,而芳香化合物组分在不同地貌区差异较大。这说明,DOM 化学组成的影响因素取决于化合物种类。土壤 DOM 化学组成复杂,根据降解特征可分为易降解组分(糖类、氨基酸、有机酸)、难降解组分(芳香化合物、木质素来源的酚类化合物)^[31-32]。环境条件变化影响微生物代谢活性,导致微生物代谢相关组分含量改变。土壤 DOM 组分中,有机酸易被微生物降解利用,而微生物代谢转化产物是脂类物质的一个主要来源^[33]。尽管耕作期作物根系分泌物中有机酸丰富,但耕作期土壤微生物活性高于休闲期,土壤微生物对有机酸利用增强,代谢转化产物增多,导致 DOM 中有机酸显著降低、脂类含量显著升高。此外,芳香化合物在土壤 DOM 中含量较少,但却是指示 DOM 稳定性的一个重要指标^[34]。难降解 DOM 组分主要受来源途径影响,环境及微生物代谢过程影

响较小^[35]。有机肥是农田土壤 DOM 芳香化合物的主要来源之一^[36-37]，本研究结果表明不同地貌区土壤 DOM 芳香化合物比例相差较大，可能是由于不同地貌区农田农作管理措施差异(比如施肥)引起的。本研究阐明土壤 DOM 组成结构在不同土地利用方式、地貌区及时期的显著性差异，但不同土地利用方式、地貌区以及时期下气候因素、土壤环境及农作管理措施都存在较大差别，影响 DOM 组成结构的关键因子还需进一步研究。

4 结论

休闲期，亲、疏水性 DOC 含量以水田显著高于旱地，耕作期无显著性差异；水田亲、疏水性 DOC 含量随时期变化明显，旱地两组分 DOC 含量相对稳定。与休闲期相比，耕作期旱地和水田土壤 DOM 中有机酸均显著减少，脂类显著增加，可见土壤环境、作物生长及人为管理措施变化对微生物代谢相关化合物影响较大。芳香化合物作为 DOM 稳定组分，在不同地貌区差异较大，可能与不同地貌区农田土壤施肥差异有关；而芳香化合物在不同时期差异不显著，说明土壤 DOM 稳定性组分主要受其来源影响。本研究揭示了田间条件下旱地和水田 DOM 随时期的变化特征，并阐明了 DOM 中微生物代谢相关组分(有机酸、脂类)和稳定性组分(芳香族化合物)在不同因子下的显著性差异，对于评价旱地和水田 DOM 稳定性及固碳机制具有一定的参考意义。

参考文献：

[1] Cook B D, Allan D L. Dissolved organic carbon in old field soils: compositional changes during the biodegradation of soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(6): 595-600

[2] 徐基胜, 赵炳梓. 可溶性有机碳在典型土壤上的吸附行为及机理[J]. *土壤*, 2017, 49(2): 314-320

[3] Mavi M S, Sanderman J, Chittleborough D J, et al. Sorption of dissolved organic matter in salt-affected soils: Effect of salinity, sodicity and texture[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 435/436: 337-344

[4] Van Hees P A W, Jones D L, Finlay R, et al. The carbon we do not see-the impact of low molecular weight compounds on carbon dynamics and respiration in forest soils: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(1): 1-13

[5] Boddy E, Hill P W, Farrar J, et al. Fast turnover of low molecular weight components of the dissolved organic carbon pool of temperate grassland field soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(4): 827-835

[6] 王春阳, 周建斌, 夏志敏, 等. 黄土高原区不同植物凋落物可溶性有机碳含量及其降解[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3001-3006

[7] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 52-60

[8] Chen X B, Wang A H, Li Y, et al. Fate of ¹⁴C-labeled dissolved organic matter in paddy and upland soils in responding to moisture[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 488/489: 268-274

[9] 苏冬雪, 王文杰, 邱岭, 等. 落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(21): 6705-6714

[10] 刘翥, 杨玉盛, 司友涛, 等. 植被恢复对侵蚀红壤可溶性有机质含量及光谱学特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(11): 1174-1183

[11] 陈香碧, 王媛华, 胡乐宁, 等. 红壤丘陵区水田和旱地土壤可溶性有机碳矿化对水分的响应[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 752-758

[12] 邓文悦, 柳开楼, 田静, 等. 长期施肥对水稻土不同功能有机质库碳氮分布的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 468-479

[13] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 农田生态系统不同土地利用方式与管理措施对土壤质量的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 303-309

[14] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1206-1217

[15] 焦坤, 李忠佩. 红壤稻田土壤溶解有机碳含量动态及其生物降解特征[J]. *土壤*, 2005, 37(3): 272-276

[16] Leenheer J A. Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and wastewaters[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, 15(5): 578-587

[17] Saiz J C. Pyrolysis/methylation of soil fulvic acids: Benzenecarboxylic acids revisited[J]. *Environmental Science and Technology*, 1994, 28(1): 197-200

[18] Plant E L, Smernik R J, Leeuwen J V, et al. Changes in the nature of dissolved organics during pulp and paper mill wastewater treatment: a multivariate statistical study combining data from three analytical techniques[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(6): 4265-4275

[19] Sihombing R, Greenwood P F, Wilson M A, et al. Composition of size exclusion fractions of swamp water humic and fulvic acids as measured by solid state NMR and pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 24(8-9): 859-873

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000

[21] Traina S J, Novak J, Smeck N E. An ultraviolet absorbance method of estimating the percent aromatic carbon content of humic acids[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19(1): 151-153

- [22] 武琳, 黄尚书, 叶川, 等. 土地利用方式对江西红壤旱地碳库管理指数的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1275–1279
- [23] 吴健敏, 郝敏, 孔范龙, 等. 土壤溶解性有机碳(DOC)动态变化影响因素研究进展[J]. 地质论评, 2013, 59(5): 953–961
- [24] 韩成卫, 李忠佩, 刘丽, 等. 去除溶解性有机质对红壤水稻土碳氮矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 107–113
- [25] 李玲, 肖和艾, 苏以荣, 等. 土地利用对亚热带红壤区典型景观单元土壤溶解有机碳含量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 122–128
- [26] 田静, 郭景恒, 陈海清, 等. 土地利用方式对土壤溶解性有机碳组成的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 338–346
- [27] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(3): 343–347
- [28] 卢萍, 单玉华, 杨林章, 等. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 736–741
- [29] Cleveland C C, Neff J C, Townsend A R, et al. Composition, dynamics, and fate of leached dissolved organic matter in terrestrial ecosystems: results from a decomposition experiment[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(3): 175–285
- [30] Huang W, McDowell W H, Zou X M, et al. Qualitative differences in headwater stream dissolved organic matter and riparian water-extractable soil organic matter under four different vegetation types along an altitudinal gradient in the Wuyi Mountains of China[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 52: 67–75
- [31] Strobel B W. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution—A review[J]. *Geoderma*, 2001, 99(3/4): 169–198
- [32] Leenheer J A, Croue J P. Peer reviewed: characterizing aquatic dissolved organic matter[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37: 18–26
- [33] Malik A A, Roth V N, Hebert M, et al. Linking molecular size, composition and carbon turnover of extractable soil microbial compounds[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 100: 66–73
- [34] James L W, George R A, Brian A B, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(20): 4702–4708
- [35] Zou L, Wang X C, Callahan J L, et al. Bacterial roles in the formation of high-molecular weight dissolved organic matter in estuarine and coastal waters: Evidence from lipids and the compound-specific isotopic ratios[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(1): 297–302
- [36] 常单娜, 曹卫东, 包兴国, 等. 西北灌漠土长期不同施肥改变土壤可溶性有机质的化学及光谱学特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(1): 220–225
- [37] 康露, 陈贺, 王富兰, 等. 蜆金龟堆肥施入后土壤腐殖质表征及特性研究[J]. *土壤*, 2014, 46(3): 452–457

Chemical Constituents of DOM in Upland and Paddy Soils Under Typical Landforms in Subtropical Region

ZHENG Xiaodong^{1,2,3}, CHEN Xiangbi^{1,3}, HU Yajun^{1,3}, SU Yirong^{1,3*}

(1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Huanjiang Observation and Research Station for Karst Eco-systems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract: In this study, the chemical constituents of dissolved organic carbon (DOM) in upland and paddy soils under typical landforms in subtropical region were investigated in order to provide theoretical basis for evaluating its stability. The chemical constituents of DOM in upland and paddy soils from karst, hilly and plain-lake areas in southern China at fallow and ploughing periods were analyzed using an XAD-8 resin-based fractionation method and pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry analysis. Results showed that higher contents of hydrophilic DOC (Hi-DOC) and hydrophobic DOC (Ho-DOC) were found in paddy soils (10.2 and 33.4 mg/kg) than in upland soils (4.15 and 12.8 mg/kg) at fallow period ($P < 0.05$), whereas no significant difference of these components was found at ploughing period. As compared with fallow period, the contents of Hi-DOC and Ho-DOC in paddy soil were significantly decreased at ploughing period ($P < 0.05$). However, those in upland soils were not greatly changed between fallow and ploughing periods. The relative proportions of organic acids in total DOM in upland and paddy soils were 31.9% and 35.6% at fallow period, but were decreased to 17.9% and 20.0% at ploughing period, respectively ($P < 0.05$). Contrary to organic acids, the relative proportions of lipids in DOM from upland and paddy soils were 55.0% and 49.5% at fallow period, but increased up to 70.1% and 62.9% at ploughing period, respectively ($P < 0.05$). The adonis test showed that the contents of Hi-DOC and Ho-DOC were significantly different between upland and paddy soils and between fallow and ploughing stages ($P < 0.05$), whereas the DOM constituents were significantly different between different periods (fallow and plough) and between different landforms (karst mountain region vs hill region, hill region vs plain-lake region) ($P < 0.05$). The random forest test showed that the organic acids and lipids involved in microbial metabolic processes, were significantly different between fallow and ploughing periods ($P < 0.05$). However, the aromatics as a stable component of DOM was significantly different between different landforms ($P < 0.05$). In brief, this study indicates that the DOC in paddy soil was more sensitive to periods than in upland soil, and reveals that the significant differences in microbial metabolic-related components (organic acids and lipids) and a stable component (aromatics) in soil DOM were various with different periods and landforms, which could provide a reference for DOM stability as well as SOC accumulation in upland and paddy soils.

Key words: Dissolved organic matter; Chemical constituent; Upland; Paddy; Fallow period; Ploughing period